

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

(11) N° de publication : **2 598 801**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **86 07340**

(51) Int Cl<sup>4</sup> : G 01 F 1/78.

(12) **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

A1

(22) Date de dépôt : 13 mai 1986.

(30) Priorité :

(43) Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 47 du 20 novembre 1987.

(50) Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

(71) Demandeur(s) : *Société anonyme dite : ASSISTANCE  
INDUSTRIELLE DAUPHINOISE A.I.D. — FR.*

(72) Inventeur(s) : Jean-Claude Guilloud.

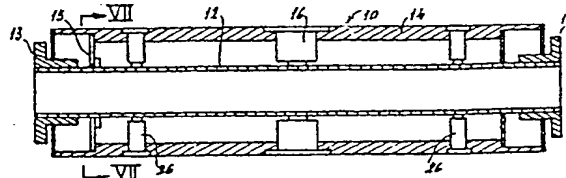
(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : Cabinet Germain et Maureau.

(54) Débitmètre massique à élasticité multimodale.

(57) Ce débitmètre comprend un tube droit 12 monté sur  
appuis ou avec encastrement dans une enveloppe rigide 14. Le  
tube est équipé d'au moins un dispositif d'excitation 16 et de  
deux capteurs de vibrations 26 situés symétriquement par  
rapport au dispositif d'excitation. Le tube 12 de l'enveloppe 14  
est associé à des moyens destinés à rapprocher les fré-  
quences au mode fondamental et du second mode de vibra-  
tion.

Application à la mesure du débit massique de fluides et  
notamment de fluides corrosifs.



FR 2 598 801 - A1

**"Débitmètre massique à élasticité multimodale"**

La présente invention a pour objet un débitmètre massique à élasticité multimodale.

Dans de nombreuses applications de laboratoires ou industrielles  
5 il est nécessaire de connaître le débit massique d'un fluide circulant dans une installation. La plupart des moyens mis en oeuvre traditionnellement mesurent les débits volumiques desquels sont déduits les débits massiques. Cependant de telles mesures introduisent un facteur d'erreur  
10 puisque le volume varie avec la température. En outre, ces moyens nécessitent l'introduction d'un organe de mesure à l'intérieur de la conduite, tel qu'hélice, flotteur ou organe déprimogène. Outre la réduction de la section de passage, la présence de l'organe de mesure à l'intérieur de la conduite augmente les difficultés de nettoyage, et suivant sa nature pose des problèmes de compatibilité avec certains fluides corrosifs, cryo-  
15 géniques, pâteux.

Pour remédier à ces inconvénients, il a été imaginé de réaliser des débitmètres à effet CORIOLIS, dans lesquels la conduite servant au passage du fluide traverse une ou plusieurs branches pouvant être mises en vibration et dont la valeur de la vibration est fonction du débit  
20 massique s'écoulant dans la conduite.

Un premier type d'appareil comportant un tronçon de conduite en forme d'épingle est représenté aux figures 1 et 2.

L'épingle 2 est excitée sur son mode fondamental de basse fréquence par un excitateur non représenté au dessin agissant selon la  
25 ligne 3, ce mode fondamental de basse fréquence étant un mode en porte-à-faux, la fréquence étant évidemment la fréquence propre de ce mode.

Lorsque le débit s'écoulant à travers l'épingle est nul, les capteurs de déplacement 4 et 5 sont en phase, c'est-à-dire montent et baissent en même temps. La torsion correspondant au second mode de  
30 vibration, n'est pas excitée car sa fréquence propre est éloignée de la fréquence fondamentale.

Lorsqu'un débit  $Q$  s'écoule à travers l'épingle 2, deux efforts de CORIOLIS opposés font apparaître un mouvement de torsion en plus du mouvement précédent, comme montré à la figure 2. Les signaux des  
35 capteurs 4 et 5 ne sont plus en phase. La différence des informations fournies par ces deux capteurs, qui représente deux fois la torsion est proportionnelle au débit massique du fait que les deux efforts de CORIOLIS

sont eux-mêmes proportionnels à ce débit.

La fréquence du mode encastré (mode fondamental) ne dépend que de la géométrie de la section du tube constituant l'épingle et de sa longueur. La fréquence du mode de torsion (second mode) ne dépend  
5 que de la géométrie du tube et de l'écartement des deux branches parallèles.

C'est donc uniquement la géométrie qui commande la séparation de ces deux fréquences, qui ne doivent pas être trop proches l'une de l'autre car, dans un tel cas, le mode de torsion apparaîtrait même sans  
10 débit lorsque l'on excite l'épingle sur la fréquence du premier mode.

En outre, les fréquences ne doivent pas être trop éloignées car les amplitudes prises en torsion, en présence d'un débit, seraient trop faibles.

La mesure des déplacements avec une seule boucle en U suppose  
15 un référentiel ayant suffisamment d'inertie pour que la mesure soit correcte. Pour s'affranchir de ces difficultés, il a été imaginé, comme représenté à la figure 3, d'utiliser une double boucle en U 6 équipée d'un excitateur 7 commun aux deux épingles, les faisant vibrer dans le mode fondamental en opposition.

Les torsions sont du même coup en opposition, comme cela  
20 ressort de la figure 4 dans lesquelles les références 6a et 6b désignent les deux épingles. Des capteurs 4 et 5, identiques à ceux décrits précédemment, mesurent des différences moins sensibles aux vibrations parasites extérieures, sauf si celles-ci sont situées dans des zones de fréquences  
25 comprenant la fréquence de torsion.

Un inconvénient essentiel de cet appareil est qu'il comprend au moins huit coudes, ce qui conduit à un encombrement important pouvant se traduire par des difficultés d'implantation sur une installation, et qu'il produit des pertes de charge importantes.

Une autre solution, consiste, comme montré à la figure 5,  
30 à utiliser un double circuit, c'est-à-dire à partager un conduit 8 en deux branches 9a et 9b symétriques, qui sont mises en vibrations de la même façon que précédemment.

L'inconvénient majeur de cette solution réside dans le partage  
35 du débit. En effet, s'il se produit un encrassement différentiel dans les deux branches 9a et 9b, le système est déséquilibré, ce qui se traduit par des erreurs de mesure.

Ce dispositif présente également l'inconvénient d'être d'un encombrement transversal important et de créer des pertes de charge compte tenu de la présence des coudes.

La présente invention vise à remédier à ces inconvénients.

5 A cet effet, le débitmètre massique qu'elle concerne comprend en combinaison :

- un tube droit de section intérieure constante, susceptible d'être mis en vibration,

- une enveloppe qui, réalisée en un matériau plus rigide que le tube, à l'intérieur de laquelle ce dernier est monté sur des appuis ou avec encastrement, sert de référence vibratoire sismique,

- au moins un dispositif mécanique ou magnétique d'excitation du mode fondamental de vibration au tube, situé dans le plan médian transversal situé à mi-longueur de celui-ci,

- au moins deux capteurs de vibration disposés symétriquement par rapport au plan d'excitation, par exemple sensiblement au quart et aux trois-quarts de la longueur du tube, de façon à être sensibles au second mode de vibration du tube contenant le fluide, et dont les réponses sont proportionnelles au débit massique de ce fluide, et

- des moyens pour assurer le rapprochement des fréquences du mode fondamental et du second mode de vibration.

Avantageusement, les moyens destinés à assurer le rapprochement des fréquences du mode fondamental et du second mode de vibrations augmentent la fréquence du mode fondamental, sans modifier sensiblement la fréquence du second mode de vibrations.

Cette technique est intéressante du fait que ce débitmètre est très compact et peut être implanté facilement sur une installation, que le tube étant droit et sans modification de section les pertes de charge sont très réduites, qu'il peut être nettoyé de façon simple et sûre, par exemple à l'aide d'une boule racleuse, ce qui n'est pas possible dans le cas où le débit est partagé.

D'un point de vue des performances, l'introduction d'une raideur adéquate dans la partie centrale du tube, permet d'augmenter le niveau de réponse dans la composante modale d'ordre 2 de la déformation générale, d'augmenter la sensibilité proportionnelle à la vitesse vibratoire au centre du tube élastique, de s'éloigner des fréquences parasites basses

(quelques dizaines de Hz), et d'augmenter la linéarité hydraulique de l'appareil.

Cet appareil permet de mesurer le débit massique de matériaux constitués par des fluides dans un état de viscosité quelconque, y compris des pâtes, des poudres et de la grenaille. Du fait de l'absence de joint, ce débitmètre est parfaitement adapté au pesage des fluides corrosifs et peut avantageusement être utilisé dans le domaine de la chimie, la pétrochimie, des fluides cryogéniques, ainsi que dans les domaines agroalimentaire, pharmaceutique, nucléaire, métallurgique y compris les aciéries (grenaille) ainsi que dans les cimenteries.

De par sa conception en ligne, qui présente l'avantage de réduire à une valeur minimale les pertes de charge, ce débitmètre se prête tout naturellement à l'adjonction, à son extrémité aval, d'un divergent permettant la récupération de l'énergie cinétique acquise dans le tube droit, et de déduire encore la perte due à l'insertion dans une ligne de production.

Outre le fait que la compacité de l'appareil facilite son insertion dans une installation de production, elle facilite également la mise en place d'une protection thermique extérieure.

De toute façon, l'invention sera bien comprise à l'aide de la description qui suit, en référence au dessin schématique annexé représentant, à titre d'exemples non limitatifs, deux formes d'exécution de ce dispositif :

Figure 6 est une vue en coupe longitudinale d'un premier débitmètre ;

Figure 7 en est une vue en coupe transversale selon la ligne VII-VII de figure 6 ;

Figure 8 est une vue en coupe longitudinale et à échelle agrandie d'un excitateur électro-magnétique que comporte ce débitmètre ;

Figures 9 et 10 sont deux vues, respectivement, en perspective d'une extrémité d'un autre débitmètre, pour la figure 9 et en coupe selon la ligne X-X de figure 9, pour la figure 10.

La figure 6 représente un premier débitmètre désigné par la référence générale 10 comprenant un tube intérieur 12, dont les deux extrémités sont équipées de brides de fixation aux conduites amont et aval d'amenée et d'évacuation du produit dont le débit massique est à mesurer.

Ce tube est monté à l'intérieur d'une enveloppe 14 réalisée en un matériau plus rigide fixée sur un support et qui, dans la forme d'exécution représentée aux figures 6 à 8, est cylindrique. Le montage du tube 12 à l'intérieur de l'enveloppe 14 est réalisé par l'intermédiaire de deux séries de pattes d'appui 15 disposées à proximité des extrémités de l'enveloppe, dont chaque série comprend quatre pattes occupant une disposition en croix, symétriquement par rapport au plan diamétral du tube contenant l'axe d'excitation. Ces pattes 15 en forme de lames, dont les extrémités sont encastrées dans l'enveloppe 14, encaissent tout déplacement axial différentiel, d'origine thermique, entre le tube 12 et l'enveloppe, et bloquent le tube en rotation en facilitant ses modes de vibrations dans un plan diamétral du débitmètre.

La mise en vibration du tube est obtenue par deux dispositifs excitateurs 16, antagonistes, perpendiculaires à l'axe du tube et disposés dans le plan médian transversal de celui-ci. Chaque dispositif comprend une bobine 17 perpendiculaire à l'axe du tube, bridée sur un support 18 solidaire de l'enveloppe.

La bobine 17 excite un noyau de fer doux 19, d'axe perpendiculaire à celui du tube 12, et en liaison avec le tube par l'intermédiaire d'un anneau de renforcement 20, solidaire de la périphérie de celui-ci.

L'extrémité libre du noyau 19 est montée sur un plateau 22 soumis à l'action d'un ressort de compression 23, prenant appui sur un bouchon 24 fixé sur le corps de l'enveloppe. Le diamètre du plateau 22 et la géométrie du ressort 23 sont définis de façon à privilégier le plan contenant l'axe du tube 12 et l'axe des vibrations excitatrices comme plan de vibration.

Pour assurer de façon certaine une vibration dans ce plan, il est possible de fixer, par collage ou soudure, des plaques planes horizontales 25 dans un plan diamétral orthogonal à l'axe d'excitation, afin d'augmenter l'inertie du tube élastique perpendiculairement à cet axe.

En l'absence de débit, la déformée du tube est la déformée fondamentale.

En présence d'un débit masse  $Q$ , prend naissance un chargement hydraulique proportionnel en chaque section au débit masse  $Q$  et à la dérivée axiale de la vitesse vibratoire imposée dans le mode fondamental. Ainsi, pour tout débit masse  $Q$ , la demi-longueur amont du tube 12 est soumise de la part du fluide à un chargement hydraulique dirigé, pendant

un quart de la période de vibrations, vers le haut, dans la mesure où la vibration fondamentale est supposée faite dans un plan vertical.

Pendant cette même demi-période, la demi-longueur aval du tube est soumise à un chargement inertiel du fluide symétrique de la précédente par rapport au centre du tube élastique et, par conséquent, dirigé vers le bas.

Cette répartition alternative avec chargement dissymétrique favorise, dans le mouvement vibratoire global du tube, l'apparition de la seconde déformation modale, qui est d'autant plus importante que le débit massique est élevé.

Dans ces conditions, le mouvement vibratoire résultant est une combinaison des deux premiers modes de vibration du tube élastique interne.

Ces mouvements sont détectés par au moins deux capteurs 26 disposés symétriquement par rapport au plan contenant l'axe d'excitation. Il s'agit de capteurs accélérométriques, capacitifs, magnétiques ou optiques. Les signaux issus de ces capteurs sont composés par différence pour donner un signal résultant proportionnel au débit massique.

Si le débit est nul, les capteurs vont délivrer des signaux de vitesse, de déplacement ou d'accélération identiques. Pour tout débit massique circulant dans le débitmètre, les détecteurs vont fournir une différence dans l'amplitude des réponses, proportionnelle au débit. Les amplitudes sur le second mode sont faibles, de l'ordre de quelques dizaines de microns et de quelques fractions de g en accélération.

Une possibilité de détection de la composante modale d'ordre 2 consiste à exploiter le fait que les amplitudes sur ce second mode sont déphasées de  $\pi$  pour des capteurs disposés symétriquement par rapport au centre du tube.

Il est à noter que, pour des capteurs de type magnétique ou capacitif, l'enveloppe extérieure rigide peut servir de référence sismique.

En raison de la présence des ressorts de compression 23, formant des éléments de raideur en compression, dont les axes sont situés dans le plan vibratoire recherché, et coaxiaux avec la ligne d'action des excitateurs, la fréquence fondamentale de vibration du tube est augmentée sans modifier la fréquence du second mode. Or, le rapprochement des fréquences du mode fondamental et du second mode de vibrations, facilite la détection des déformées modales d'ordre 2.

Cette disposition augmente, en outre, la sensibilité du débitmètre, qui est directement proportionnelle à la vitesse vibratoire appliquée au centre du tube, et qui, pour une amplitude de déformation donnée, est d'autant plus grande que la fréquence d'excitation est importante.

5 En outre; le fait d'opérer sur une fréquence plus élevée, permet de s'affranchir des fréquences parasites des conduites situées dans une zone de quelques Hz à une trentaine de Hz.

Selon une autre caractéristique de l'invention, les capteurs, quel qu'en soit le type, sont montés en opposition pour augmenter la  
10 linéarité de la réponse et s'affranchir au mieux des problèmes thermiques.

L'information fournie sur la fréquence permet d'avoir connaissance de la densité du mélange moyen contenu à chaque instant dans le débitmètre. A débit nul, on obtient l'état d'encrassement de l'appareil après vidange, qui résulte d'une diminution de la fréquence de résonance  
15 du mode fondamental.

Il est possible de réaliser un montage pivotant de l'enveloppe  
14 sur son support, par exemple autour d'un axe orthogonal à celui du tube, afin de permettre, après désolidarisation des brides 13 du reste de l'installation, le basculement du débitmètre afin de faciliter son net-  
20 toyage.

Les figures 9 et 10 représentent une variante d'exécution de ce débitmètre, dans laquelle le tube central 27 est monté avec encastrement coulissant dans les extrémités 28 de l'enveloppe 29. Cette solution convient pour encaisser toute dilatation thermique, le tube étant fixé  
25 dans le plan médiateur du débitmètre par les lames ressort 32.

Lorsque les dilatations thermiques différentielles du tube et de l'enveloppe sont faibles ou lorsque l'appareil fonctionne avec des fluides cryogéniques par exemple l'encastrement 28 peut être non coulissant.

Dans la forme d'exécution représentée à la figure 9, l'enveloppe  
30 29 est ajourée, comportant un certain nombre d'ouvertures longitudinales 30, ménagées dans sa partie centrale.

Les dispositifs d'excitation 16 et les capteurs 26 sont de type connu et ne seront donc pas décrits en détail. Une différence du débit-  
mètre représenté aux figures 9 et 10 avec celui décrit précédemment  
35 réside dans le fait que les éléments raidisseurs sont constitués par des lames 32 élastiques, disposées dans un plan orthogonal à l'axe d'excitation et à mi-longueur du tube, et fixées, d'une part, sur le tube 27 et



d'autre part, sur l'enveloppe 29.

Comme il ressort de ce qui précède, l'invention apporte une grande amélioration à la technique existante, en fournissant un débitmètre massique de conception simple, donnant des mesures très précises et très fiables, ne perturbant pas l'écoulement du fluide, susceptible d'être traversé par des fluides de toutes natures et d'être nettoyé très facilement après utilisation.

Il est à noter que ce débitmètre pourrait se présenter sous une forme différente sans que l'on sorte pour autant du cadre de l'invention, l'essentiel étant que l'enveloppe extérieure soit rigide et constitue une référence vibratoire pour tous les capteurs sensibles à la déformation élastique du tube central sur son second mode, et que l'on rapproche les fréquences de vibration du mode fondamental et du second mode.

C'est ainsi que la section du tube intérieur pourrait être différente et notamment rectangulaire, afin de favoriser la déformation du tube dans un plan déterminé sans nécessiter de dispositifs annexes, tels que ceux décrits précédemment.

REVENDECATIONS

1. Débitmètre massique à élasticité multimodale, caractérisé en ce qu'il comprend :

- un tube droit (12,27) de section intérieure constante, susceptible d'être mis en vibration,
- une enveloppe (14,29) qui, réalisée en un matériau plus rigide que le tube, à l'intérieur de laquelle ce dernier est monté sur des appuis (15) ou avec encastrement (28), sert de référence vibratoire sismique,
- au moins un dispositif (16) mécanique ou magnétique d'excitation du mode fondamental de vibration du tube, situé dans le plan médian transversal situé à mi-longueur de celui-ci,
- au moins deux capteurs de vibration (26) disposés symétriquement par rapport au plan d'excitation, par exemple sensiblement au quart et aux trois-quarts de la longueur du tube (12,27), de façon à être sensibles au second mode de vibration du tube contenant le fluide, et dont les réponses sont proportionnelles au débit massique de ce fluide, et
- des moyens (23,32) pour assurer le rapprochement des fréquences du mode fondamental et du second mode de vibration.

2. Débitmètre selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens (23,32) destinés à assurer le rapprochement des fréquences du mode fondamental et du second mode de vibration, augmentent la fréquence du mode fondamental, sans modifier sensiblement la fréquence du second mode de vibration.

3. Débitmètre selon la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens augmentant la fréquence du mode fondamental sont constitués par des éléments raidisseurs (23,32) disposés à mi-longueur du tube, entre celui-ci et l'enveloppe.

4. Débitmètre selon la revendication 3, caractérisé en ce que les éléments raidisseurs sont constitués par des lames élastiques (32) qui, disposées dans un plan orthogonal à l'axe d'excitation et à mi-longueur du tube (27), sont fixées d'une part sur le tube (27) et d'autre part sur l'enveloppe (29).

5. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il comprend des lames élastiques (15) disposées symétriquement par rapport au plan médian transversal du tube (12) et de l'enveloppe (14), et symétriquement par rapport au plan diamétral de vibration situées entre le tube et l'enveloppe, qui encaissent tout

déplacement axial différentiel d'origine thermique entre le tube et l'enveloppe et bloquent le tube en rotation en favorisant ses modes de vibration dans un plan diamétral du débitmètre.

5 6. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le tube (12) est entouré, dans sa partie centrale, d'un anneau de renforcement (20) sur lequel agit chaque dispositif d'excitation (16).

10 7. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le tube (12) est équipé d'éléments d'inertie (25) situés symétriquement par rapport au plan diamétral contenant l'axe d'excitation, afin de privilégier un plan de vibration.

8. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que les capteurs de vibration (26) sont montés en opposition.

15 9. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que l'enveloppe (14,29) du tube (12,27) est montée avec possibilité de pivotement sur son support autour d'un axe orthogonal à celui du tube.

20 10. Débitmètre selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'un élément divergent est monté à l'extrémité aval du tube.

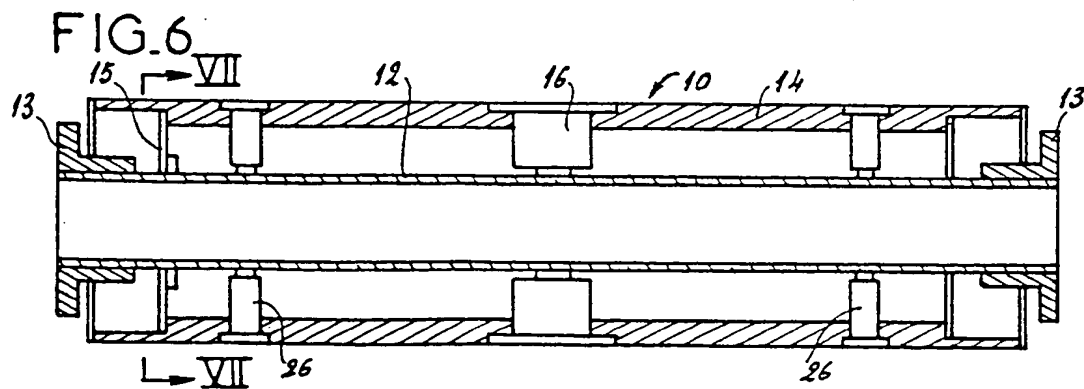
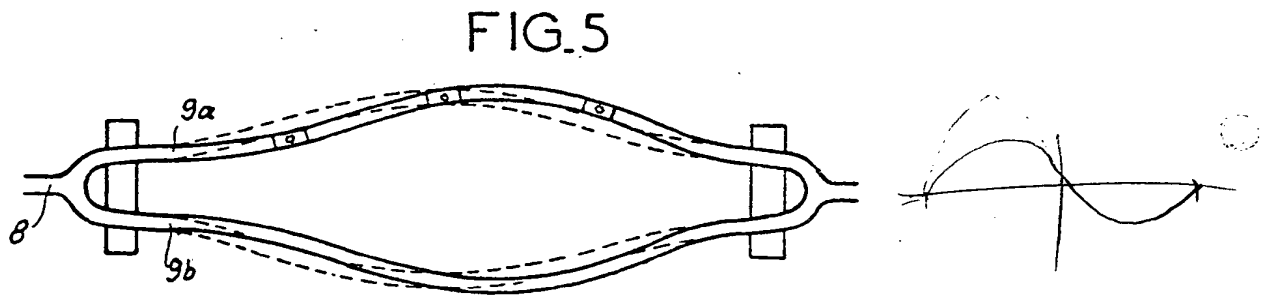
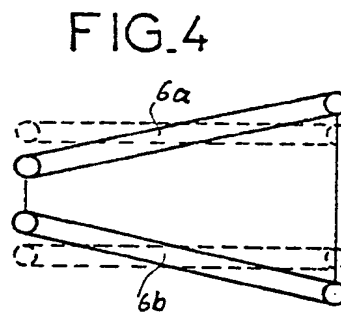
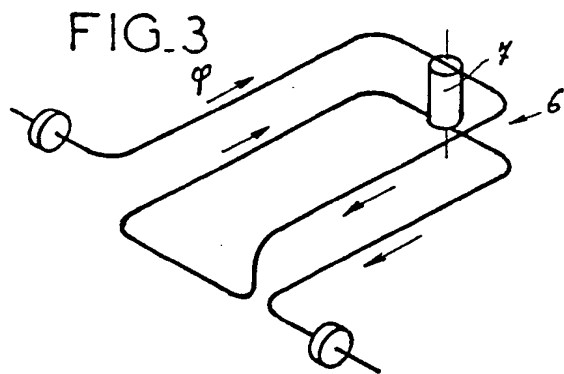
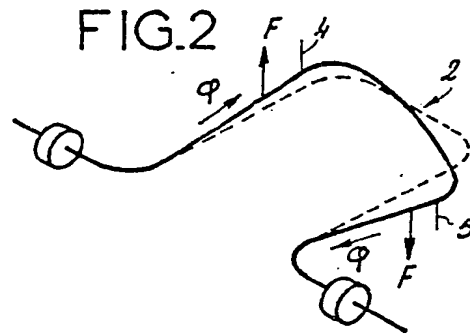
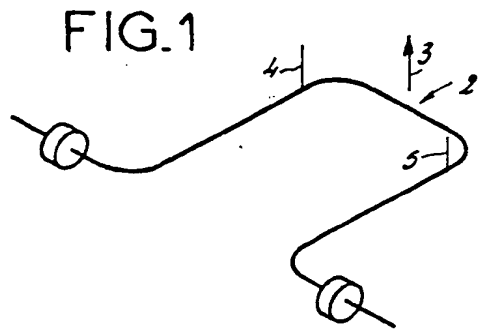


FIG.7

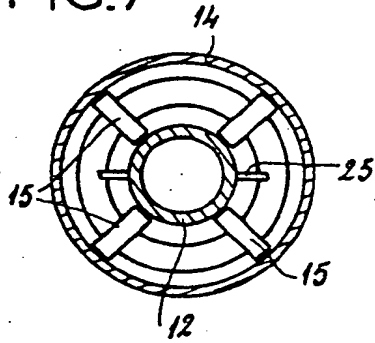


FIG.8

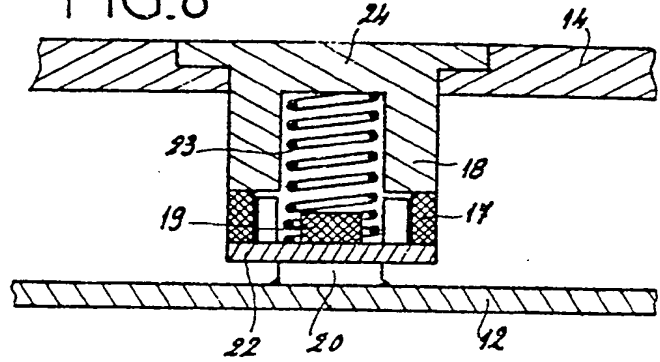


FIG.9

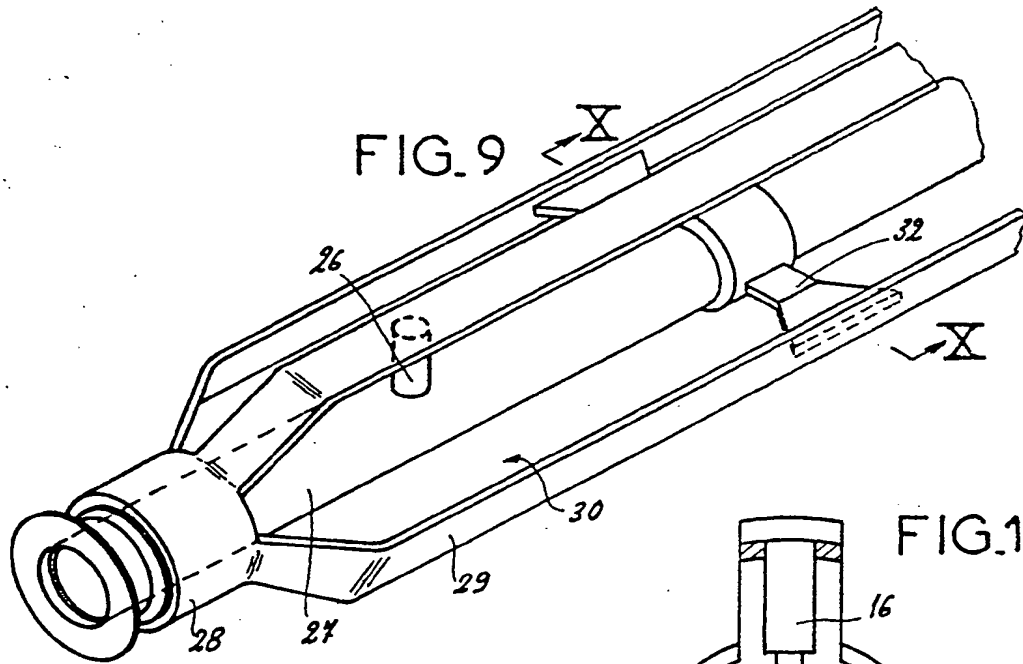


FIG.10

